

SPIR dynamique MO fertilisants

Laurent Thuries

D1

Laurent THURIES, chercheur au CIRAD.

Je vais vous présenter l'intérêt de la Spectroscopie dans le Proche Infra rouge (SPIR) dans le domaine des fertilisants organiques.

Cette présentation sera illustrée d'exemples d'utilisation de la SPIR pour le suivi de l'élaboration des fertilisants organiques et la prévision de leur dynamique de transformation après apport aux sols.

La plupart de ces travaux ont été menés au CIRAD en collaboration avec l'entreprise Phalippou-Frayssinet SA, leader sur le marché français des fertilisants organiques.

D2

Pour ce qui est de la modélisation TAO (transformation des apports organiques), je vous invite à suivre le cours sur les indicateurs.

Quand on se trouve confronté à l'étude de processus dynamiques comme la transformation des apports organiques dans les sols, on a besoin de jeux de données souvent volumineux, et également d'analyses répétées à la fois dans le temps et dans l'espace.

Il y a intérêt à constituer une base de données par des analyses de référence des caractéristiques des apports organiques et des matières organiques des sols, des données recueillies au laboratoire, sur le terrain ou bien dans la littérature, pour capitaliser toutes ces informations.

Un outil se prête bien à l'étude de ces processus dynamiques, la SPIR (Spectroscopie dans le Proche Infra rouge) et je vous invite à ce propos à suivre le cours SPIR général.

Quelques exemples illustreront cette présentation :

- 1) l'utilisation de la SPIR pour aider à la maîtrise du processus de compostage
- 2) les analyses des teneurs en matière organique, azote total et lignine
- 3) le calcul d'un potentiel d'humification des apports organiques (comme l'ISB indice de stabilité biologique ou la CBM-Tr caractérisation biochimique de la matière organique taux de carbone résistant à long terme)
- 4) la prédiction des dynamiques de transformation des apports organiques à l'aide du modèle TAO

D3

A l'aide d'un traitement mathématique des données spectrales, ici une analyse en composantes principales des données spectrales d'amendements organiques, tourteaux végétaux, d'engrais organo-minéraux, d'engrais organo-minéraux bio, et d'engrais organiques, on peut visualiser certaines ressemblances ou des filiations entre différents ensembles de produits qui peuvent être élaborés par mélange de plusieurs matières premières.

D4

Premier exemple d'utilisation de la SPIR : le suivi d'un process industriel, le compostage.

Tout d'abord, le contexte : composter des MO d'origine agro-industrielle pour élaborer des fertilisants organiques de qualité connue (et constante). Pour l'industriel,

il est important de procéder à un contrôle de qualité durant toute l'élaboration du produit.

Une étape clé: la phase thermophile.

Objectif: on doit respecter cette phase sans dépassement inutile du temps de compostage (pour des raisons économiques).

L'autre intérêt de la SPIR ici, c'est d'explorer la possibilité de prédire par SPIR le degré de compostage (le temps réel de compostage).

Au démarrage d'une nouvelle fabrication, le mélange initial est constitué par un très gros tas, un andain de plus de 2000 tonnes, qui peut nécessiter plusieurs semaines (jusqu'à 12) pour sa réalisation. Aussi, il est intéressant de mieux connaître le degré de compostage d'un andain élémentaire.

Une figure illustre l'utilisation de prédictions SPIR pour gérer les premières phases de l'élaboration des composts

On élabore ces composts par des mélanges de différents types de matières premières. A partir du temps où le mélange est constitué (âge du compost = 0), le compostage, processus naturel, commence. La première phase, la phase thermophile, voit la température de l'andain augmenter.

A l'aide de prédictions SPIR, si l'on juge que cette phase est terminée, on procède au retournement de l'andain, sinon, l'andain est laissé à composter.

D5

Les performances du modèle de calibrage (étalonnage) général sont illustrées dans ce tableau. La durée moyenne de compostage est de 32 jours ; elle varie beaucoup (+/- 23 jours) car on a prélevé des bases organiques en cours de compostage provenant de 6 séries différentes (avec des durées de compostage variant de 0 à 103 jours).

Une série est constituée par un andain unique échantillonné régulièrement pendant toute la durée de la phase thermophile.

Le modèle SPIR est relativement bon (R^2 près de 0.9), avec un critère qualitatif modeste ($RPD < 3$, Cf. cours SPIR général).

L'écart type de validation croisée (SECV, écart-type résiduel) étant proche de l'écart type de calibrage (SEC), le modèle est donc relativement robuste.

Dans le tableau 2, on met en évidence les performances du modèle d'étalonnage particulier. Il a été élaboré selon une autre stratégie (non plus en PLS mais en MLR, Cf. cours SPIR général) sur une seule série de 22 échantillons du même andain suivi tout au long de son évolution.

La population a un âge moyen de 50 jours +/- 32 jours. Les statistiques d'étalonnage sont bien sûr différentes ($n=22$ échantillons). Le R^2 est largement supérieur à 0.95, SEC et SECV ont diminué de près d'un tiers par rapport à ceux du modèle général, le critère RPD est largement supérieur à 3, tout en ayant SEC proche de SECV. Le modèle est donc non seulement performant, mais robuste également.

L'écart type résiduel est d'environ 7 jours, ce qui est intéressant pour l'industriel. L'objectif serait d'obtenir un SECV d'environ 4 jours (ou moins)

D6

Voici le 2^{ème} exemple d'utilisation de la SPIR pour la prédiction des teneurs en lignine, matière organique et azote total, illustré dans le tableau 3.

Les populations sur lesquelles ont été élaborés les modèles d'étalonnage sont nettement plus importantes que celles vues précédemment (ici de + de 100 à + de 300 individus).

Même si ces populations sont variables (Cf. SD), les modèles sont performants ($R^2 > 0.9$ et SECV relativement faibles, Cf. Tab 3 et Figure 2).

La précision des modèles est bonne également : les écart types des valeurs de référence obtenues au laboratoire sont comparables aux SECV. Par exemple, SEref MO est proche de SECV MO. Pour l'azote total, il y a un rapport d'environ 1 à 3 entre SEref et SECV, mais en valeur absolue, cela reste très faible (inférieur à 0.2g d'Ntot pour 100 g de matière sèche).

Pour la lignine, SECV est environ 2 fois SEref, mais quand on considère le coût et le temps nécessaires pour des analyses de ces paramètres par les méthodes de référence, la performance et la précision de l'estimation par SPIR sont très correctes.

D7

Troisième exemple d'utilisation de la SPIR pour le calcul du potentiel d'humification des apports organiques (ici la CBM-Tr), le calcul des rapports lignine/azote et carbone/azote qui peuvent être utilisés pour la modélisation de la transformation des apports organiques.

Graphiquement (Figure 4), la performance de ces modèles est bien mise en évidence, en particulier pour ce qui est de la CBM-Tr.

Les modèles sont corrects pour Lig/N et C/N.

Ici la teneur en carbone est estimée par la moitié de la teneur en matière organique obtenue par perte au feu.

D8

Quatrième et dernier exemple : l'utilisation de la SPIR pour l'expression des potentiels. On a ici une utilisation concrète de la SPIR et du modèle TAO pour la prévision des dynamiques de transformation du carbone des apports organiques.

Pour des matières organiques d'origines et de natures différentes, on peut disposer d'analyse de référence (au laboratoire) ou de prédictions SPIR. Considérant que le modèle TAO est gouverné par les proportions de compartiment labile (PL), stable (PS) et résistant à la dégradation (PR), et sachant que ces proportions dépendent des teneurs en composés solubles au détergent neutre, hémicelluloses, cellulose et lignine (selon la méthode d'extraction séquentielle de fibres de Van Soest), des teneurs en MO (et son corollaire la teneur en cendres) et en azote total, l'objectif est de prédire les dynamiques de transformation de ces diverses matières organiques.

D9

Les matériaux objets de l'étude étaient d'origine végétale et issus de l'industrie de transformation agro-alimentaire : pulpes (raisin, olive), tourteaux (café, cacao).

Les teneurs en fraction 'soluble au détergent neutre', hémicelluloses, cellulose et lignine, ont été mesurées selon **AFNOR XPU 44-162** (2004), Carbone et Azote selon Dumas (analyseur élémentaire), MO et cendres par calcination.

Les étalonnages SPIR ont été élaborés à partir d'un ensemble de 146 échantillons (Thuriès et al., 2005) comprenant les matériaux illustrés ici.

On a 2 jeux de données pour TAO-C:

1) la composition biochimique mesurée au laboratoire des apports organiques dont les cinétiques ont été mesurées ;

2) la moyenne de la composition biochimique estimée par SPIR sur un ensemble d'apports organiques de même nature (ex : 40 pulpes d'olives) ne possédant pas de mesure de référence de laboratoire.

Au Tableau 4, sont présentées les teneurs en fibres de ces tourteaux mesurées au laboratoire et les valeurs prédites par étalonnage SPIR. Il y a une bonne relation entre ces valeurs mesurées et prédites.

D10

Une illustration graphique (Figure 6) des prédictions par TAO-C de la fraction de carbone minéralisé de 4 types de tourteaux végétaux. Les variables d'entrées du modèle TAO sont soit mesurées au laboratoire soit prédites par SPIR.

En toute logique, les cinétiques de minéralisation du C des apports illustrées dans cette étude sont bien simulées par TAO-C à partir des caractéristiques biochimiques mesurées au laboratoire, puisqu'elles étaient comprises dans l'ensemble des apports utilisés initialement (Thuriès et al., 2001) pour paramétrer le modèle.

Il est intéressant de remarquer que les cinétiques de minéralisation du C sont également très bien simulées par TAO-C à partir de caractéristiques biochimiques prédites par SPIR. La qualité de ces simulations égale (cas des Cacao, Olive, Café) ou semble même dépasser (Raisin) celle des simulations obtenues à partir des caractéristiques mesurées au laboratoire.

D11

Nous avons vu plusieurs exemples d'utilisation de la SPIR pour l'industrie des fertilisants organiques ;

D'une part pour aider à la maîtrise du procédé industriel de compostage, et aussi prédire les potentiels d'humification et les dynamiques de transformation des apports organiques (via le modèle TAO), l'objectif final étant la production de fertilisants organiques avec un ajustement entre l'offre en nutriments et la demande par la plante.

D12

Je vous invite à consulter ces références pour approfondir le sujet.

Merci de votre attention.